

# МОНИТОРИНГ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ ВОЛГУ В НИЖНЕМ НОВГОРОДЕ.

## Контроль динамических характеристик

О. В. КРУТИКОВ, к. т. н., генеральный директор ООО «Т.К.М.»;

И. В. КРУТИКОВ, ведущий инженер ООО «Т.К.М.»;

Д. И. РЫЖОВ, старший инженер ООО «Т.К.М.»;

И. А. КУЗЬМИН, старший инженер ООО «Т.К.М.»;

С. Е. ПОЛЕТАЕВ, зам. начальника отдела искусственных сооружений ГКУ НО «ГУАД»

*СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МОСТОВ ОСНАЩАЮТСЯ РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДАТЧИКОВ, КОТОРЫЕ ПОЗВОЛЯЮТ ОСУЩЕСТВЛЯТЬ КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ, КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ И ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РАБОТУ КОНСТРУКЦИИ МОСТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННЫХ И ВРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК.*

**М**остовой переход через р. Волга находится на автомобильной дороге Нижний Новгород — Шахунья — Киров в городе Нижний Новгород. Введен в эксплуатацию в 2017 году. Ось мостового перехода располагается в 60 м ниже по течению от оси существующего совмещенного моста. Проезд автотранспорта осуществляется по двум полосам движения в одном направлении со стороны г. Нижний Новгород. Мостовой переход включает в себя левобережную эстакаду, русловую часть, правобережную эстакаду.

**ПРОЕКТИРОВЩИК МОСТА ЧЕРЕЗ ВОЛГУ:**  
ОАО «ИНСТИТУТ ГИПРОСТРОЙМОСТ», г. МОСКВА.  
**ГЕНПОДРЯДЧИК:** НИЖЕГОРОДСКАЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ФИРМА «МОСТОТРЕД-1» — ФИЛИАЛ ПАО «МОСТОТРЕСТ».  
**ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МОНТАЖ ВАНТ:** VSL (SWITZERLAND) LTD.  
**ЭКСПЛУАТИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:** ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ «ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ» (ГКУ НО «ГУАД»).



Рис. 1. Общий вид арочных пролетных строений

Русловая часть мостового перехода включает в себя два разрезных цельнометаллических арочных пролетных строения (рис. 1, 2). Расчетный пролет арок — 159 м, габарит проезда — 10,5 м. В поперечном сечении затяжка пролетных строений состоит из двух металлических коробчатых блоков, объединенных с ортотропной плитой проезжей части. В поперечном сечении арка пролетных строений состоит из двух плоских серповидных ферм, объединенных поперечными и продольными связями. Пояса ферм — коробчатые герметичные. Подвески арочных пролетных строений — ванты, состоящие из системы параллельных пучков, сформированных из



Рис. 2. Вид на проезжую часть арочного пролетного строения

параллельных оцинкованных семипроволочных прядей с индивидуальной оболочкой, расположенной внутри внешней полиэтиленовой трубы.

Система мониторинга состояния моста через р. Волгу в период эксплуатации (СМС-МВНН) введена в действие в 2017 году при возведении моста. Система создана ООО «Т.К.М.» Цель мониторинга — наблюдение за работой конструкции моста и условиями его эксплуатации, включающее в себя технический контроль параметров мониторинга для обеспечения безопасных условий эксплуатации сооружения и накопление данных о работе моста при воздействии реальных подвижных нагрузок и природных факторов. Мониторинг состояния моста ч/р Волга по назначению является контрольным и исследовательским, по форме представления информации в течение времени — непрерывным [5].

СМС-МВНН включает в себя датчики, размещенные непосредственно на опорах и арочных пролетных строениях 15–16 и 16–17:

- датчики деформации (56 шт.), обеспечивающие измерение параметров работы моста, характеризующих его напряженно-деформированное состояние;
- датчики температуры (12 шт.), обеспечивающие измерение температуры элементов моста;
- датчики усилия в подвесках (76 шт.), обеспечивающие измерение (оценку) усилия в подвесках;
- акселерометры (18 шт.), обеспечивающие информацией о колебаниях моста в условиях эксплуатационных воздействий;
- инклинометры (2 шт.) и датчики перемещения (2 шт.), обеспечивающие измерение параметров работы моста, характеризующих его пространственное положение;
- видеокамеры (2 шт.), обеспечивающие съемку обстановки на проезжей части.

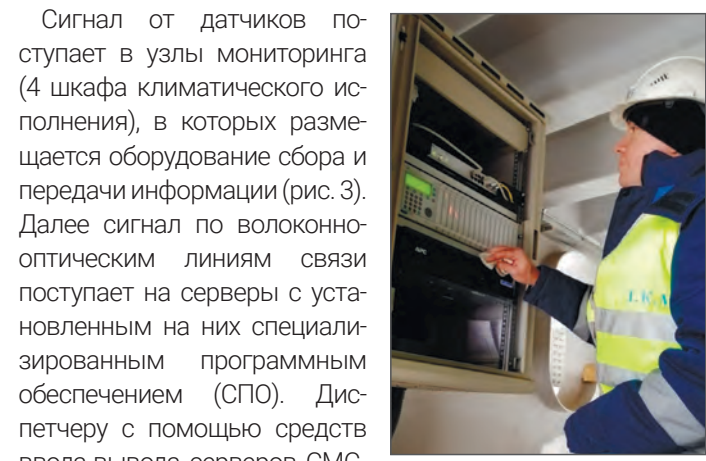


Рис. 3. Узел мониторинга

Сигнал от датчиков поступает в узлы мониторинга (4 шкафа климатического исполнения), в которых размещается оборудование сбора и передачи информации (рис. 3). Далее сигнал по волоконно-оптическим линиям связи поступает на серверы с установленным на них специализированным программным обеспечением (СПО). Диспетчеру с помощью средств ввода-вывода серверов СМС-МВНН доступны результаты прямых измерений, получаемых с помощью перечисленных выше средств, а также косвенная информация — результаты аналитической обработки, выполняемой в реальном времени.

Мониторинг, реализуемый СМС-МВНН, — динамический. Это означает, что СМС-МВНН непрерывно получает подробную информацию о НДС конструкции в объеме, достаточном для анализа ее работы в условиях реальных скоростей движения автомобилей. При частоте опроса 100 Гц, принятой в СМС-МВНН, датчиками одновременно фиксируются состояния конструкции, соответствующие положениям движущегося со скоростью 90 км/ч автомобиля через каждый 0,25 м. При динамическом мониторинге с помощью датчиков возможно выявить, например, направление движения, скорость и массу проезжающего по мосту автотранспортного средства [1].

Для исследования колебаний пролетных строений установлено 18 акселерометров, в том числе 12 акселерометров, регистрирующих колебания в вертикальном направлении, и 6 акселерометров — поперек моста. Датчики размещены в затяжках пролетных строений 15–16 (рис. 4, 5), 16–17 в 6-ти сечениях (в 1/4 и 1/2 пролета), по три в сечении.

В статье [3] рассмотрены вопросы получения динамических характеристик моста, таких как частоты и периоды основных форм собственных колебаний и соответствующие им декременты с учетом требований ГОСТ Р 54859-2011 на основе экспериментальных данных, получаемых при мониторинге технического состояния моста.

Для получения теоретических данных с целью изучения динамических характеристик моста были выполнены расчеты арочного пролетного строения на колебания [2]. Расчет был выполнен по программе расчета стержневых систем GERWIN, разработанной доцентом Гершуни И.Ш. на кафедре мостов МИИТа. Были вычислены

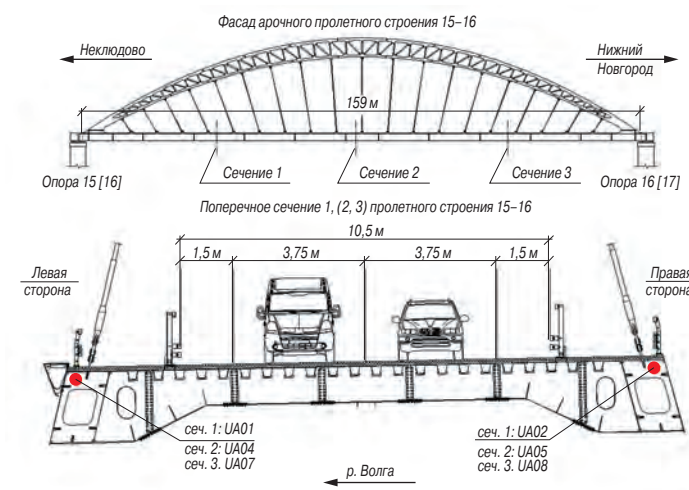


Рис. 4. Расположение акселерометров, регистрирующих колебания в вертикальном направлении

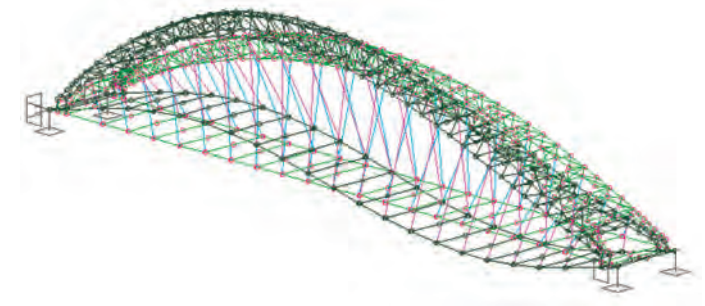


Рис. 5. Затяжка п.с. с акселерометром

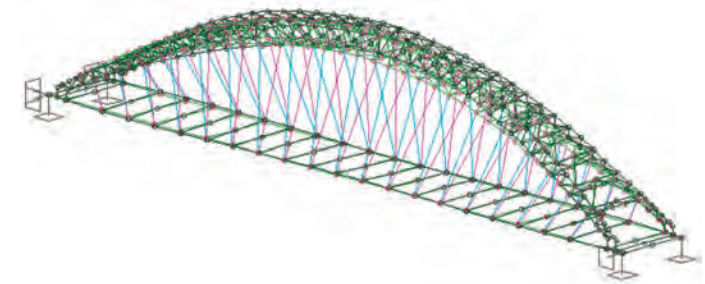
пять первых частот в порядке их возрастания в интервале от 0,781 Гц до 2,22 Гц. Расчетные формы колебаний №№ 1-3 приведены на рис. 6. Расчетные формы колебаний №1, №3 — №5 характеризуются вертикальным перемещением точек модели. Согласно расчетной форме колебаний № 2 перемещения точек модели происходят в горизонтальном поперечном направлении. Далее рассматриваются сигналы, полученные СМС-МВНН, от акселерометров, регистрирующих колебания пролетного строения 15–16 в вертикальном направлении. Также учитываются значения температуры конструкции от соответствующих датчиков системы. Рассмотрена серия из 12 реализаций, записанных в течение 2021 года. Каждая из реализаций относится к определенному месяцу года и получена в один из первых дней месяца. Данные записывались в ночное время. Длительность реализации около 3 ч. Частота опроса  $f_s = 100$  Гц и связанный с ним период дискретизации сигналов  $\Delta t = 0,01$  с.

Согласно ГОСТ Р 54859-2011 определение частоты формы собственных колебаний производится при фильтрации полученного спектра мощности полосовым фильтром с границами частотной полосы пропуска-

а) форма колебаний №1,  $f=0,781$  Гц,  $T = 1,28$  с



б) форма колебаний №2,  $f=1,257$  Гц,  $T = 0,80$  с



в) форма колебаний №3,  $f=1,430$  Гц,  $T = 0,70$  с



Рис. 6. Расчетные формы собственных колебаний

Таблица 1. Границы диапазонов поиска периодов и частот собственных колебаний

Форма колебаний	$f_1 \dots f_2$ , Гц	$T_1 \dots T_2$ , с
№ 1	0,7...0,9	1,11...1,43
№ 3	1,4...1,55	0,65...0,71
№ 4	1,6...1,8	0,56...0,63
№ 5	2,05...2,25	0,45...0,49



Таблица 2.

Динамические характеристики конструкции по результатам обработки сигнала акселерометра UA01

Форма колебаний	№1				№3				t, °C
	T, с	$\sigma_T \cdot 10^{-3}$ , с	D	$\sigma_D \cdot 10^{-3}$	T, с	$\sigma_T \cdot 10^{-3}$ , с	D	$\sigma_D \cdot 10^{-3}$	
03.01.2021	1,226	3,61	0,196	9,13	0,665	0,98	0,100	3,52	-1,1
02.02.2021	1,187	4,80	0,203	10,84	0,655	1,05	0,103	7,52	-11,6
02.03.2021	1,230	3,77	0,192	11,34	0,665	1,50	0,118	7,88	-1,5
02.04.2021	1,233	2,66	0,163	7,00	0,666	0,99	0,102	4,10	2,1
03.05.2021	1,235	2,34	0,176	10,21	0,672	0,34	0,101	5,66	8,2
03.06.2021	1,242	1,24	0,169	8,33	0,669	1,87	0,108	10,10	11,4
04.07.2021	1,241	1,70	0,150	6,00	0,672	0,60	0,089	4,55	17,6
04.08.2021	1,246	2,36	0,172	7,70	0,675	1,03	0,112	9,47	20,0
03.09.2021	1,241	2,40	0,177	8,04	0,668	1,47	0,108	4,30	10,0
03.10.2021	1,233	2,66	0,180	5,51	0,668	0,90	0,109	5,70	6,7
03.11.2021	1,241	1,70	0,167	6,21	0,670	1,05	0,128	9,46	5,3
03.12.2021	1,210	3,75	0,204	9,48	0,661	1,13	0,100	6,66	-3,0

ния  $f_1, f_2$  и последующем поиске в спектре максимума. Границы частот ( $f_1, f_2$ ) и соответствующие им периоды ( $T_1, T_2$ ) приведены в табл. 1.

Расчеты выполнены методом периодограмм с использованием программы «СпектрКат», разработанной в ООО «Т.К.М.» [3]. Согласно этому методу динамические характеристики вычисляются по серии выборок, состоящих из  $nd$  сегментов каждый длиной по  $n_{seg}$  отсчетов. Используются следующие значения параметров:  $n_d=8; n_{seg}=4096$ . Дополнительно в программе заданы следующие условия: без перекрытия сегментов (перекрытие 0%) и без изменения амплитуд сигнала (вид окна: прямоугольное).

При обработке реализации сигнала акселерометра, относящейся к определенному месяцу, получались ряды значений частот  $f_{jp}$ , периодов  $T_{jp}$ , декрементов  $D_{jp}$ , где  $i=1...32$  и  $j=1...4$  – порядковые номера, соответственно, выборки и диапазона поиска. Отмечается, что в заявленных диапазонах в спектрах мощности устойчиво обнаруживаются максимумы, период которых близок теоретическим значениям периодов форм собственных колебаний. Вне данной статьи применительно к рассматриваемому объекту установлено, что соответствие частот максимумов спектров теоретическим формам собственных колебаний подтверждается также и в части амплитуд [2].

По итогам обработки отдельной реализации для каждой из четырех форм получены динамические характеристики конструкции такие, как период  $T$  и декремент  $D$ , а также среднеквадратические отклонения периода  $\sigma_T$  и декремент

та  $\sigma_D$ . Результаты обработки реализаций по всем месяцам года приведены для акселерометра UA01 для форм колебаний №№1, 3 (табл. 2). В таблице также приведены даты записи реализаций и средняя температура конструкции по данным от соответствующих датчиков.

Отмечается близость значений периодов акселерометров, соответствующих одной реализации. Наблюдается разброс характеристик между реализациями. На рис. 7 построен график периодов  $T$  форм собственных колебаний, полученных для акселерометров UA01, UA07 от температуры конструкции  $t$ . Отмечается зависимость периодов от температуры: с увеличением  $t$  повышаются значения  $T$ .

В табл. 3 приведены средние значения динамических характеристик: периодов  $T$ , среднеквадратических отклонений периода  $\sigma_T$ , декрементов  $D$  за 12 месяцев для всех рассмотренных акселерометров. Значения средних периодов  $T$ , относящиеся к одному диапазону, полученные по данным разных акселерометров, равны с высокой точностью.

Динамические характеристики, такие как периоды и логарифмические декременты собственных колебаний сооружения, являются важными расчетными параметрами при анализе изменений напряженно-деформированного сооружения, в процессе эксплуатации. Их возможное изменение в период эксплуатации будет свидетельствовать об изменении массы или жесткости конструкции. Так, следует ожидать изменения динамических характеристик при нахождении на мосту большого количества автомобилей, при выпадении большого

Таблица 3.

Средние значения динамических характеристик за 1 год

Форма колебаний	№1			№3		
	T, с	$\sigma_T \cdot 10^{-3}$ , с	D	T, с	$\sigma_T \cdot 10^{-3}$ , с	D
UA01	1,230	2,75	0,179	0,667	1,08	0,107
UA02	1,230	2,89	0,179	0,667	1,02	0,106
UA04	1,231	5,21	0,257	0,666	0,76	0,096
UA05	1,230	4,37	0,238	0,666	0,75	0,096
UA07	1,230	2,86	0,183	0,668	1,01	0,105
UA08	1,230	2,77	0,179	0,668	1,00	0,105

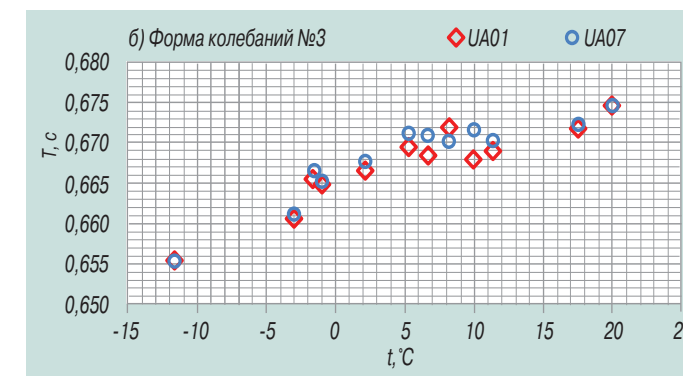
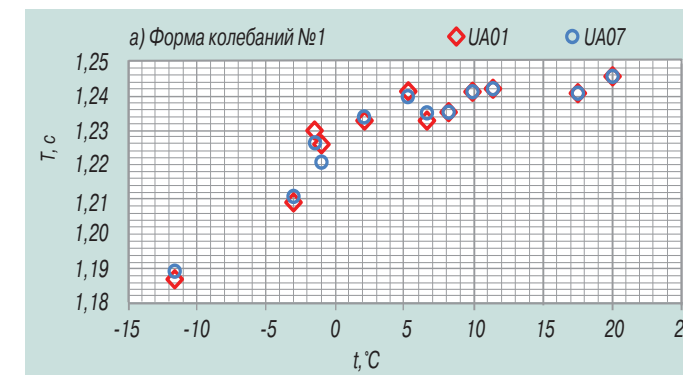


Рис. 7. Периоды форм собственных колебаний в зависимости от температуры конструкции для различных форм собственных колебаний.

количества снега и т.п. На основании полученных результатов установлено, что характеристики изменяются в зависимости от температуры. Динамические характеристики с учетом приведенных результатов должны быть использованы при контроле состояния моста в реальном времени.

Для контроля пролетного строения с использованием периодов и логарифмических декрементов собственных колебаний достаточно небольшого количества акселерометров, установленных в местах существенных (не нулевых) перемещений конструкции согласно учитываемым формам собственных колебаний. Большое количество акселерометров, распределенных по конструкции, необходимо для подтверждения соответствия частот максимумов спектров теоретическим формам собственных колебаний в части амплитуд.

**Т.К.М.**

Общество с ограниченной ответственностью «Т.К.М.»  
 Москва, 127055, а/я 68.  
 Тел /факс (+7 495) 689-51-89.  
 тел. (+7 495) 979 -16-47  
 e-mail: info@tkm-most.ru  
<https://tkm-most.ru>

**Литература**

1. Крутиков О.В., Рыжов Д.И., Дабижа Ю.С., Белов Р.А. Мониторинг моста через р. Волга на 176 км автодороги М-10 «Россия» с контролем воздействующей на него подвижной нагрузки // Мир дорог. – 2021. – № 140. – С. 88-91.
2. Крутиков О.В., Гершуни И.Ш., Рыжов Д.И. Оценка форм собственных колебаний пролетных строений моста при мониторинге // Транспортные сооружения. – 2022. – Т 9. – № 2. – URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS222.pdf> DOI: 10.15862/01SATS222
3. Крутиков О. В., Гершуни И. Ш., Рыжов Д. И. Оценка динамических характеристик моста при мониторинге в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54859-2011 // Дороги и мосты. – 2022. – № 1(47). – с. 210-226.
4. ГОСТ Р 54859-2011. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона. – М.: Стандартинформ, 2012. – 17 с.
5. ОДМ 218.4.002-2008. Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). – М., 2008. – 44 с.